

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



PA P

## Prioritätsbescheinigung DE 101 45 297.7 über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 101 45 297.7

Anmeldetag: 14. September 2001

Anmelder/Inhaber: ROBERT BOSCH GMBH, 70469 Stuttgart/DE

Bezeichnung: Verfahren zum Einätzen von Strukturen  
in einen Ätzkörper mit einem Plasma

IPC: H 01 L 21/3065, H 01 J 37/32, H 05 H 1/46,  
C 23 C 4/00

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der Teile der am  
14. September 2001 eingereichten elektronischen Dokumente dieser  
Patentanmeldung unabhängig von gegebenenfalls durch das Druckverfahren be-  
dingten Farbabweichungen.

München, den 6. Juli 2010  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Die Präsidentin

Im Auftrag

Weiss



23.08.01 Kut/Dm

ROBERT BOSCH GMBH, 70442 Stuttgart

5

Verfahren zum Einätzen von Strukturen in einen Atzkörper mit einem Plasma

10 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Einätzen von Strukturen in einen Atzkörper, insbesondere von lateral exakt definierten Ausnehmungen in einen Siliziumkörper, mit einem Plasma, nach der Gattung des Hauptanspruches.

15 Stand der Technik

Bei Plasmaatzprozessen zum Einätzen von lateral exakt definierten Ausnehmungen in einen Siliziumkörper, beispielsweise nach Art der DE 42 41 045 C1, tritt vielfach das Problem einer unzureichenden Taschenstabilität auf, das heißt es kommt zur Ausbildung von Abweichungen vom gewünschten Atzprofil insbesondere an der Grenzfläche zwischen dem Atzkörper und einem dielektrischen Interface, beispielsweise zwischen Silizium und darunter befindlichen Siliziumdioxid.

20  
25  
30  
35 In der Anmeldung DE 199 57 169 A1 ist dazu bereits eine so- genannte Doppelpulstechnik beschrieben worden, bei der über eine niederfrequente Pulsung eines hochfrequent modulierten Tragersignals von hoher Impulsspitzenleistung an der Substrat elektrode in der Atzkammer einer induktiv gekoppelten Plasmaatzanlage eine Unterdrückung dieser unerwünschten Taschenbildung und gleichzeitig ein weites Prozessfenster für den Plasmaatzprozess erreicht wird. Insbesondere wird damit eine ausreichende Taschenstabilität bei Aspektverhältnissen der eingeätzten Strukturen von 5:1 bis 10:1 erreicht sowie



eine gewisse Toleranz gegenüber einem Überatzen erreicht. Bei noch höheren Aspektverhältnisse der erzeugten Trenchgraben bzw. hohen Überatzzeiten ist jedoch auch in diesem Prozess die Taschenbildung nicht vollständig zu unterdrücken.

5

In DE 199 33 842 A1 wurde vorgeschlagen, auch die induktiv gekoppelte Plasmaquelle zu pulsieren, so dass während der Pausen der Plasmaentladung vermehrt auftretende Anionen zur Entladung von positiven Aufladungen eines dielektrischen Ätzgrundes in Strukturen mit hohem Aspektverhältnis beitragen. Ein massives Problem bei einem derartigen Pulsen von ICP-Plasmaquellen (ICP = „inductively coupled plasma“) ist das Auftreten hoher reflektierter Leistungen in dem zugeordneten Hochfrequenzgenerator, da während des Zündens der Plasmaentladung im Plasma undefinierte Bedingungen vorliegen, die eine Anpassung der eingekoppelten Hochfrequenzleistung an die Plasmaimpedanz während der Transienten sehr schwierig machen. So stellt das Zünden der Plasmaentladung einen Übergang von einem elektrisch kapazitiv gekoppelten zu einem induktiv gekoppelten Modus dar, was zu Impedanzfehlankopplungen und damit hohen reflektierten Leistungen führt.

15

20

25

30

Zur Überwindung dieser Probleme ist in DE 199 27 806 A1 vorgeschlagen worden, über eine Ruckkoppelungsschaltung nach Art eines Meißner'schen Oszillators mit der Plasmaquelle als frequenzbestimmendes Glied und einem Hochfrequenzgenerator als Verstärker im Ruckkoppelungspfad während der Transientenphasen die Frequenz der Anregungsspannung freizugeben. Dieses Verfahren hat jedoch den Nachteil, dass Frequenzen außerhalb des für Industrieanlagen freigegebenen Frequenzreiches auftreten können, was eine entsprechende Abschirmung erfordert.

In der unveröffentlichten Anmeldung DE 100 51 831.1 ist

35 schließlich bereits eine Vorrichtung und ein Verfahren zum

Atzen eines Substrates mittels eines induktiv gekoppelten Plasmas vorgeschlagen worden, bei dem zwischen dem Substrat und der ICP-Quelle ein statisches oder zeitlich variierbares Magnetfeld vorgesehen ist, das über mindestens zwei, übereinander angeordnete, gegensinnig von Strom durchflossene Magnetspulen erzeugt wird.

5

Aufgabe der vorliegenden Erfindung war die Bereitstellung eines Verfahrens zum Einätzen von Strukturen in einen Atzkörper mit einer verbesserten Taschenstabilität, insbesondere bei hohen Aspektverhältnissen der eingeätzten Strukturen und hohen Überätzzeiten.

(10)

#### Vorteile der Erfindung

15

20

Das erfindungsgemäße Verfahren hat gegenüber dem Stand der Technik den Vorteil einer deutlich erhöhten Taschenstabilität beim Atzen beispielsweise von Silizium, insbesondere beim Erreichen einer vergrabenen dielektrischen Atzstopp-schicht wie einer  $\text{SiO}_2$ -Schicht, sowie einer vergroßerten Toleranz gegenüber einem Überätzen.



Vorteilhafte Weiterbildungen und Erfindung ergeben sich aus in den Unteransprüchen genannten Maßnahmen.

25

30

35

So ist besonders vorteilhaft, wenn die Intensität des Plasmas so moduliert bzw. gepulst wird, dass in den „Entladungspausen“ die Plasmaentladung gerade nicht erlischt und im induktiv gekoppelten Mode verbleibt, das heißt, es wird während dieser Zeitspanne gerade so viel Hochfrequenzleistung der Plasmaquelle bzw. dem induktiv gekoppelten Plasma zugeführt, wie für die Aufrechterhaltung einer Minimalentladung erforderlich ist. Dadurch dass das Plasma in diesen Entladungspausen bzw. Pulspausen nicht vollständig erlischt, wird beim nachfolgenden Hochfahren des Plasmas auf Maximalinten-

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100

5 sitat jedesmal verhindert, dass eine hohe reflektierte Leistung auftritt, da die elektrisch kapazitiv gekoppelte Startphase der Plasmaentladung weitgehend vermieden, und gleich in der induktiv gekoppelten Phase der Plasmaentladung gestartet wird.

Dabei ist weiter vorteilhaft, wenn die in die Substratelektrode eingekoppelte Hochfrequenzleistung, was gemäß der in DE 199 57 169 A1 beschriebenen Doppelpulstechnik erfolgt, zeitlich mit der Modulation der Plasmaintensität korreliert oder synchronisiert wird.

15 In diesem Zusammenhang ist weiter vorteilhaft, dass während der Entladungspausen das zuvor von positiv geladenen Ionen und Elektronen dominierte Plasma in ein sogenanntes „ambipolares“ Plasma aus positiv und negativ geladenen Ionen übergeht, d.h. es werden in sogenannten „after-glow“-Phasen, entweder durch Rekombinationen mit positiv geladenen Ionen oder durch Einfangen von Neutralteilchen, freie Elektronen eingefangen. Aufgrund des zahlenmäßigen Übergewichts der die Elektronen umgebenden Neutralteilchen, ist die Erzeugung von Anionen durch Elektroneneinfang dabei die dominierende Reaktion. Während somit in einem „normalen“ Plasma die Anzahl der negativen Ladungsträger mit einer Masse, die einem Mehrfachen der Protonenmasse entspricht, um drei bis vier Größenordnungen kleiner ist als die Anzahl der positiven Ladungsträger mit einer Masse, die einem Mehrfachen der Protonenmasse entspricht, wird in diesen Phasen die Anzahl dieser negativen und positiven Ladungsträger nun annähernd gleich. 20 25 30 35 Da weiter mit dem kleiner werdenden Anteil freier Elektronen gegenüber den Ionen im Plasma auch die Konsequenzen der ungleichen Ladungsträgermassen und Ladungsträgerbeweglichkeiten verschwinden, nähert sich das Plasmapotential von zuvor positiven Werten im Bereich von einigen 10 Volt einen Wert um 0 V an, so dass nun positive wie negative Ladungsträger

in gleicher Weise den zu prozessierenden Atzkörper, beispielsweise einen Siliziumwafer erreichen können, was dort einen optimalen Ladungsausgleich auch bei hohen Aspektverhältnissen ermöglicht.

5

Zwar lässt sich ein induktiv gekoppeltes Plasma völlig ohne Elektronen nicht aufrecht erhalten, je kleiner dabei aber die Dichte der Elektronen ist, umso aquivalenter werden positive und negative Ladungsträger, und umso besser funktioniert die Neutralisation störender Aufladung. Insofern ist bei dem erfindungsgemäßen Verfahren besonders vorteilhaft, wenn die Elektronendichte möglichst klein ist bzw. dass diese bei dessen Durchführung klein gehalten werden kann.

10 15 Die vorgenommene Modulation der Plasmaintensität als Funktion der Zeit kann schließlich vorteilhaft neben einer sich insbesondere periodisch zeitlich andernden, in das Plasma eingekoppelten Hochfrequenzleistung aus dem entsprechenden Spulengenerator alternativ oder zusätzlich auch durch eine beispielsweise periodisch sich andernde Feldstärke eines auf das Plasma einwirkenden Magnetfeldes, beispielsweise eines Magnetfeldes einer Vorrichtung nach Art der DE 100 51 831.1, erfolgen.

20

25

Zeichnung

30 35 Die Erfindung wird anhand der Zeichnungen und der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigt Figur 1 eine Prinzipskizze einer Plasmaatzzvorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, Figur 2 erläutert ein erstes Ausführungsbeispiel einer zeitlichen Modulation der Plasmaintensität, die mit der hochfrequent gepulsten, niedrfrequent modulierten Hochfrequenzleistung, die in die Substratelektrode eingekoppelt wird, synchronisiert ist, Figur 3 erläutert die Struktur der hochfrequent gepulsten,

5

niederfrequent modulierten Hochfrequenzleistung gemäß Figur 2, Figur 4 erläutert ein zweites Ausführungsbeispiel der Modulation der Plasmaintensität und deren Synchronisation mit der in die Substratelektrode eingekoppelten Hochfrequenzleistung, Figur 5 erläutert ein drittes Ausführungsbeispiel auch während der niederfrequent getakteten Pulspausen, und Figur 6 erläutert das zweite Ausführungsbeispiel auch während der niederfrequent getakteten Pulspausen.

#### Ausführungsbeispiele

15

Die Figur 1 zeigt eine aus DE 100 51 831.1 bekannte Plasmazanzlage 5 mit der beispielsweise ein anisotroper Plasmazprozess in Silizium zur Herstellung von Trenchgräben nach Art der DE 42 41 045 C1 durchgeführt wird. Im Einzelnen ist dazu eine Atzkammer 10, eine Substratelektrode 18 mit einem darauf angeordneten Substrat 19, beispielsweise einem Siliziumwafer, vorgesehen. Weiter steht die Substratelektrode 18 mit einer zweiten Matchbox 21 zur Impedanzanpassung und darüber mit einem Substratleistungsgenerator 22 elektrisch in Verbindung.

20

Im oberen Bereich der Atzkammer 10 ist eine die Atzkammer 10 umgebende Spule 11 vorgesehen, die über eine erste Matchbox 12 zur Impedanzanpassung mit einem Spulengenerator 13 in Verbindung steht. Über den genannten Spulengenerator 13 und die erste Matchbox 12 wird mit Hilfe der Spule 11 eine Hochfrequenzleistung in die Atzkammer 10 eingekoppelt, so dass sich dort ein induktiv gekoppeltes Plasma 15 ausbildet. Daneben ist gemäß Figur 1 vorgesehen, dass die Atzkammer 10 in ihrem oberen Bereich einen Gaseinlass 14 und in ihrem unteren Bereich eine Gasabfuhr 20 zur Zufuhr bzw. Abfuhr von Prozessgasen, beispielsweise abwechselnd Atz- und Passiviergasen, aufweist.

35

Schließlich ist die Atzkammer 10 zwischen dem Erzeugungsbe-  
reich des induktiv gekoppelten Plasmas 15 und der Substrate-  
lekrode 18 von zwei Feldspulen 16 umgeben, wozu zwei ent-  
sprechende Distanzstücke 17 in die Seitenwand der Atzkammer  
5 10 eingesetzt sind, die diese Spulen 16 aufnehmen.

Hinsichtlich des detaillierten Aufbaus der Plasmaatzanlage 5  
sei weiter auf die Ausführungen in DE 100 51 831.1 verwie-  
sen.

10 Zur Modulation der Intensität des Plasmas 15 als Funktion  
der Zeit mit Hilfe des Spulengenerators 13 und der ersten  
Matchbox 12 ist die aus DE 199 27 806 A1 oder bevorzugt die  
aus DE 199 33 842 A1 bekannte Vorrichtung vorgesehen, die  
15 beispielsweise, wie dort beschrieben, in die erste Matchbox  
12 oder den Spulengenerator 13 integriert ist.

20 Weiterhin wird mit Hilfe des Substratleistungsgenerators 22,  
der zweiten Matchbox 21 und der Substratelekrode 18 in das  
Substrat 19 eine hochfrequent gepulste, niederfrequent modu-  
lierte Hochfrequenz eingekoppelt, wie dies in DE 199 57 169  
5 A1 beschrieben ist.

25 Die Figur 3 erläutert diese hochfrequent gepulste, nieder-  
frequent modulierte Hochfrequenzleistung, wobei in die Sub-  
stratelekrode 18 periodisch abwechselnd niederfrequent ge-  
taktete Pulspakete 30 und niederfrequent getaktete Pulspau-  
sen 31 mit einer Frequenz von beispielsweise 1 Hz bis  
30 500 Hz, vorzugsweise 10 Hz bis 250 Hz, beispielsweise  
100 Hz, bei einem sogenannten „Duty Cycle“ von 20% bis 80%,  
vorzugsweise 50%, und einer mittleren Leistung von vorzugs-  
weise 5 Watt bis 20 Watt, beispielsweise 10 Watt, eingekop-  
pelt werden. Die niederfrequent getakteten Pulspakete 30 ge-  
maß Figur 3 bestehen dabei aus einer periodisch abwechseln-  
35 den Abfolge von hochfrequent getakteten Pulsen 32 und hoch-

5 frequent getakteten Pulspausen 33, wobei die Frequenz dieser Periode bei vorzugsweise 10 kHz bis 500 kHz, beispielsweise 100 kHz, und der „Duty Cycle“ vorzugsweise 2% bis 20%, beispielsweise 5%, beträgt. Die dabei in die Substratelektrode 18 eingekoppelte mittlere Leistung liegt im Zeitmittel beispielsweise bei 5 Watt bis 40 Watt, insbesondere 20 Watt während der hochfrequent getakteten Pulse 32.

10 Schließlich ist in Figur 3 erkennbar, dass ein einzelner hochfrequent getakteter Puls 32 aus einem hochfrequenten Tragersignal mit einer Frequenz von beispielsweise 13,56 MHz und einer Hochfrequenzleistung von vorzugsweise 100 Watt bis 1 kWatt, beispielsweise 400 Watt besteht. Hinsichtlich weiterer Details zur Figur 3 sei im Übrigen auf die Anmeldung 15 DE 199 57 169 A1 verwiesen.

20 Bei den Signalformen an der Substratelektrode 18 gemäß Figur 3 ist insbesondere darauf zu achten, dass ausreichend lange, durch die niedrfrequente Taktung entstehende Pulspausen 31 eingehalten werden, während der eine die Entladung im Bereich einer dielektrischen Grenzschicht in den geätzten Trenchgraben erfolgen kann. Während diese langsame Pulsung die Prozessstabilität an sich reduziert, und damit zu einem engen Prozessfenster führte, wird durch die zusätzliche 25 hochfrequente Modulation des hochfrequenten Tragersignals 34 mit möglichst niedrigem Puls-zu-Pause-Verhältnis („Duty Cycle“), beispielsweise einem Verhältnis von 1:10 oder 1:20, eine sehr hohe Substratelektrodenspannung bei gleichzeitig niedrigem Stromfluss zur Substratelektrode 18, so dass sich 30 dennoch ein sehr weites, tolerantes Prozessfenster einstellt. Der „Duty Cycle“ steuert dabei die Strom- Spannungsrelation und damit den scheinbaren ohm'schen Widerstand des Plasmas 15 von der Substratelektrode 18 aus betrachtet.

Die Figur 2 erläutert ein erstes Ausführungsbeispiel des erfundungsgemäßen Verfahrens, wobei die hochfrequent gepulste, niederfrequent modulierte Hochfrequenzleistung in der Substratelektrode 18 gerade so mit der Modulation der Plasmaintensität synchronisiert wird, dass eine Plasmaanregung mit minimaler Leistung (Plasma nahezu aus), das heißt ein erstes Plasmaintensitätsminimum 41, jeweils mit den niederfrequent getakteten Pulspausen 31 zusammen fällt. Dies führt zu einer verstarkten Entladung der erzeugten Trenchgräben während der niederfrequent getakteten Pulspausen 31, da nicht nur eine Selbstentladung der Trenchgraben stattfindet, sondern vermehrt auch Anionen zum Strukturgrund hingezogen werden und die dort befindlichen positiven Ladungen neutralisieren.

Das in Figur 2 eingezeichnete Taktverhältnis von 1:1, das heißt das Verhältnis der Zeitdauer der ersten Plasmaintensitätmaxima 40 zu der Zeitdauer der ersten Plasmaintensitätsminima 41, ist im Übrigen nur exemplarisch zu sehen. Vielmehr ist es aus Gründen der Plasmaanregungseffizienz günstig, das Plasma 15 möglichst lange anzuregen und möglichst kurze Zeit auszutasten, d.h. es ist vorteilhaft, bei der Tastung der Anregung bzw. der Plasmaintensität ein Verhältnis von deutlich unter 1:1 einzustellen, um zu vermeiden, dass die benötigten Impulsspitzenleistungen der in das Plasma 15 einzukoppelnden Hochfrequenzleistung immens groß werden. Beispielsweise werden für eine mittlere Leistung an der Spule 11 von 3 kW bis 5 kW beim Tastverhältnis von 1:1 bereits 6 kW bis 10 kW Impulsspitzenleistung benötigt, um den gewünschten zeitlichen Mittelwert zu erreichen.

Der Figur 2 ist schließlich entnehmbar, dass die Zeitdauer der ersten Plasmaintensitätmaxima 40 und der nachfolgenden ersten Plasmaintensitätsminima 41 gleich der Zeitdauer der niederfrequent getakteten Pulspakete 30 bzw. der nachfolgenden niederfrequent getakteten Pulspausen 31 ist. Zudem ist

die Intensität des Plasmas 15 während der ersten Plasmaintensitätminima 41 so gering gewählt, dass das Plasma 15 während dieser Plasmaintensitätsminima gerade nicht erlischt.

5 Die Figur 4 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel einer Synchronisation der Modulation der Plasmaintensität mit der hochfrequent gepulsten, niederfrequent modulierten Hochfrequenzleistung in der Substratelektrode 18. Um dabei ein möglichst hohes Taktverhältnis aufrecht zu erhalten, werden beispielsweise, wie dargestellt, jeweils zwei oder auch mehr hochfrequent getaktete Pulse 32 an der Substratelektrode 18 von einem zweiten Plasmaintensitätsmaximum 40' eingeschlossen, und das Plasma 15 während der darauf folgenden, hochfrequent getakteten Pulspause 33 in einen „Low“-Modus geschaltet, das heißt die Plasmaintensität erreicht ein zweites Plasmaintensitätsminimum 41', das so gering gewählt ist, dass das Plasma 15 in dieser Zeit gerade nicht erlischt. Insofern fallen stets zwei oder auch mehr hochfrequent getaktete Pulse 32 in ein zweites Plasmaintensitätsmaximum 40', bevor wieder die hochfrequent getaktete Pulspause 33 mit dem zweiten Plasmaintensitätsminimum 41' zusammenfällt.

10  
15  
20  
25  
30  
35  
Der Vorteil des Ausführungsbeispiels gemäß Figur 4 gegenüber dem Ausführungsbeispiel gemäß Figur 2 liegt darin, dass sich im Fall der Figur 4 weniger Ladungen in erzeugten Trenchgräben während der relativ langen „Ein“-Zeiten der vergleichsweise niederfrequenten Modulation der Plasmaintensität akkumulieren können. Dadurch dass jedesmal nur vergleichsweise wenige hochfrequent getaktete Pulse 32, beispielsweise maximal 20, mit dem zweiten Plasmaintensitätsmaximum 40' zusammenfallen, werden nur relativ wenige elektrische Ladungen während dieser Zeit in den Trenchgraben akkumuliert, bevor während eines nachfolgenden zweiten Plasmaintensitätsminimums 41' wieder eine Entladung auftritt.

Vieleher ist es sogar so, dass die höchsten Anionenkonzen-  
trationen in dem Plasma 15 nur während einer kurzen Zeit-  
spanne beim und unmittelbar nach dem Zusammenbrechend des  
zweiten Plasmaintensitätsmaximums 40' vorliegen, das heißt,  
5 die maximale Entladungswirkung wird nur für eine kurze Zeit  
während und nach dem Übergang in das zweite Plasmaintensi-  
tätsminimum 41' erreicht. Danach ist nur noch eine deutlich  
reduzierte Anionenkonzentration in dem Plasma 15 verfügbare,  
10 was für den Einsatz möglich kurzer Plasmaintensitätsminima  
41' und eine entsprechend hohe Entladeffizienz spricht. Da-  
neben ist es auch im Fall des Ausführungsbeispiels gemäß Fi-  
gur 4 nicht ratsam, bei der Plasmaanregung bzw. der in das  
Plasma 15 eingekoppelten Hochfrequenzleistung zu einem  
15 Tastverhältnis von wesentlich weniger als 1:1 zu gehen, da  
ansonsten die benötigten Impulsspitzenleistungen für die  
Plasmaerzeugung unwirtschaftlich hoch werden.

Konkret liegt die in das induktiv gekoppelte Plasma 15 ein-  
gekoppelte Hochfrequenzleistung erneut zwischen 3 kW und  
20 5 kW, die Frequenz der hochfrequent getakteten Pulse 32 und  
der nachfolgenden hochfrequent getakteten Pulspausen 33 bei  
beispielsweise 100 kHz bei einem „Duty Cycle“ von 5%, und  
die mittlere, in die Substratelektrode 18 eingekoppelte  
Hochfrequenzleistung während der niederfrequent getakteten  
25 Pulspakete 30 bei beispielsweise 20 Watt, wobei im Übrigen  
in Figur 4 lediglich die Modulation der Plasmaintensität  
während eines einzelnen, niederfrequent getakteten Pulspake-  
tes 30 gemäß Figur 2 dargestellt ist. Im Anschluss an dieses  
niederfrequent getaktete Pulspaket 30 folgt dann eine nie-  
30 derfrequent getaktete Pulspause 31 gemäß Figur 2 während der  
gleichzeitig auch die Intensität des Plasmas 15 auf das er-  
ste Plasmaintensitätsminimum 41 gemäß Figur 2 sinkt und dort  
während der Zeit der niederfrequent getakteten Pulspause 31  
verbleibt. Dies ist zur Verdeutlichung in Figur 6 vollstan-  
35 dig dargestellt.

5

Die Figur 5 erläutert ein drittes Ausführungsbeispiel für eine zeitliche Synchronisation einer Modulation der Intensität des Plasmas 15 mit der hochfrequent gepulsten, niederfrequent modulierten Hochfrequenzleistung, die in die Substratelektrode 18 eingekoppelt wird. Dabei wird im Unterschied zu Figur 6 auch während der niederfrequent getakteten Pulspause 31 die zeitliche Modulation der Intensität des Plasmas 15 gemäß Figur 4 aufrechterhalten.

15

20

25

30

35

Auf diese Weise wird erreicht, dass während der relativ langen niederfrequent getakteten Pulspausen 31, wobei der Begriff „relativ lange“ in Bezug auf die Abklingdauer der Anionenkonzentration in dem Plasma 15 nach dessen Zusammenbruch bzw. dem Übergang der Plasmaintensität auf das zweite Plasmaintensitätsminimum 41' zu verstehen ist, immer wieder das Plasma 15 hochgefahren und wieder heruntergefahren wird, so dass sich die Phasen eines Plasmazusammenbruchs mit der damit verbundenen erhöhten Anionenkonzentration ständig wiederholen. Insofern wird die niederfrequent getaktete Pulspause 31 effektiver genutzt, in dem nicht nur einmal zu deren Beginn ein Plasmazusammenbruch mit erhöht auftretender Anionenkonzentration generiert wird, die danach, gemessen an der Zeitdauer der niederfrequent getakteten Pulspause 31, schnell wieder abklingt, sondern immer wieder solche Phasen für die Entladung der in dem Atzkörper erzeugten Trenchgräben bereit gestellt werden. Insofern dienen die niederfrequent getakteten Pulspausen 31 nun nicht mehr nur der Selbstentladung der Trenchgräben, sondern es werden zusätzlich periodisch während der niederfrequent getakteten Pulspausen 31 „Anionenkonzentrationsspitzen“ bereitgestellt, die den Entladungsprozess beschleunigen. Daneben entschärft sich durch diese Vorgehensweise auch das Problem eines zu geringen „Duty Cycle“ für die Plasmaerzeugung, da durch die Entkopplung der Plasmaerzeugung von der niederfrequenten Mo-

dulation der Hochfrequenzleistung an der Substratelektrode 18 nun in einfacher Weise auch ein „Duty Cycle“ von besser als 1:1 erreichbar ist.

5 Um die Intensität des Plasmas 15 auf das Intensitätsminimum 41, 41' nahe an einem Erlöschen des Plasmas 15 einzustellen und zu stabilisieren, macht man von der Tatsache Gebrauch, dass die in den Spulengenerator 13 reflektierte Leistung sprunghaft ansteigt, wenn das Plasma 15 zu erlöschen, das heißt aus einem induktiven Mode in einen elektrisch kapazitiv gekoppelten Mode überzugehen droht. Durch sofortiges 10 Hochregeln der Vorwärtsleistung des Spulengenerators 13 lässt sich dieser Zustand abfangen und an der Grenze des induktiv gekoppelten Betriebsmodus halten, so dass die derart 15 gesteigerte Leistung des Spulengenerators 13 die Elektronendichte in dem Plasma 15 wieder auf den Wert eines stabilen Betriebszustandes hebt.

20 Die Vorwärtsleistung  $P_{Forward}$  des Spulengenerators 13 wird dabei in den Plasmaintensitätsminima 41, 41' mit der in den Spulengenerator 13 reflektierten Leistung  $P_{Reflected}$  gekoppelt nach:

$$P_{Forward} = P_{Soll} + V \cdot P_{Reflected}$$

25 wobei V ein Verstärkungsfaktor des Regelkreises ist, für den bevorzugt gilt:  $V \gg 1$ . Der Fall  $V = 1$  entspricht der bei modernen Hochfrequenzgeneratoren üblichen „Load“-Regelung, das heißt die Vorwärtsleistung wird bei Auftreten von reflektierter Leistung so geregelt, dass die Differenz zwischen Vorwärtsleistung und Rückwärtsleistung, das heißt die tatsächlich in das Plasma 15 eingekoppelte Hochfrequenzleistung, dem vorgegebenen Sollwert entspricht und konstant 30 bleibt. Dieser Fall der gewöhnlichen „Load“-Regelung ist vielfach unzureichend für die Stabilisierung des Plasmas 15 an der kritischen Modengrenze, da sich hierbei die effektiv 35 in das Plasma 15 eingekoppelte Hochfrequenzleistung nicht

erhöht, wie es für ein Abfangen eines zusammenbrechenden Plasmas 15 erforderlich wäre. Insofern wird der Regelfaktor V hier bevorzugt auf Werte deutlich größer 1, beispielsweise auf Werte zwischen 5 und 10, eingestellt, wobei zudem als 5 Sollwertvorgabe ( $P_{Soll}$ ) einen Wert möglichst nahe oder sogar etwas unterhalb des Wertes einstellt, der für einen Grenzbetrieb des Plasmas 15, d. h. eine Intensität knapp oberhalb dem Erloschen des Plasmas 15, benötigt wird.

10 Im Übrigen kann die vorstehend erläuterte Pulsstrategie, d. h. die Modulation der Plasmaintensität und der in die Substratelektrode 18 eingekoppelte Hochfrequenzleistung als Funktion der Zeit bei einem Prozess nach Art der DE 42 41 045 C1 sowohl im Verlauf der Depositionszyklen als während 15 der Atzzyklen eingesetzt werden. In der Regel genügt es jedoch, sie auf die Atzzyklen zu beschränken, da nur während der Atzzyklen die Gefahr der Taschenbildung besteht. Zudem steht dann während der Depositionszyklen die volle Generatorleistung zur Verfügung. Zudem ist es vielfach auch vorteilhaft, während der Depositionszyklen das Einkoppeln von 20 Hochfrequenzleistung in die Substratelektrode 19 ganz auszuschalten.

25 Eine besonders einfache Modulation der Intensität des Plasmas 15 ergibt sich durch Einsatz einer induktiv gekoppelten Plasmaquelle mit einer Magnetspulenordnung, wie sie in der Anmeldung DE 100 51 831.1 beschrieben und in Figur 1 dargestellt ist. Hierbei werden zwischen der ICP-Quelle, d. h. dem induktiv gekoppelten Plasma 15, und dem Substrat 19 mindestens zwei Magnetfeldspulen 16 angeordnet, wobei eine obere Magnetfeldspule 16 der ICP-Quelle zugewandt und eine untere Magnetfeldspule dem Substrat 19 zugewandt ist, die von 30 gegensinnigen und im Allgemeinen unterschiedlich großen elektrischen Stromen durchflossen werden, so dass sie gegen-

einander gerichtete, in der Regel unterschiedlich starke Magnetfelder erzeugen.

Im Einzelnen wird dabei die obere, der ICP-Quelle zugewandte Magnetfeldspule 16 auf eine Magnetfeldstärke eingestellt, wie sie für eine optimale Plasmaerzeugung erforderlich ist, während die untere, dem Substrat 19 zugewandte Magnetfeldspule 16 ein entgegen gesetzt gerichtetes Magnetfeld erzeugt, dessen Starke so eingestellt ist, wie es für eine optimale Uniformität der Atzung, d. h. eine optimale Verteilung des Energieeintrages über die Oberfläche des Substrates 19, erforderlich ist.

Der Einsatz der Magnetfeldspulen 16 bewirkt zunächst, dass damit vor allem im Grenzfall des gerade nicht erloschenden Plasmas ein Plasma 15 mit niedrigerer Anregungsdichte und Elektronenkonzentration unterhalten werden kann, als es ohne diese möglich wäre. Dies liegt daran, dass das erzeugte Magnetfeld „die Lebensdauer“ der im Plasma 15 befindlichen Elektronen erhöht, indem Wandverluste im Quellenbereich reduziert werden, so dass darüber besonders gut ein gewünschtes „ambipolares“ Plasma mit minimaler Dichte an freien Elektronen während der Plasmaintensitätsminima 41, 41' aufrecht erhalten werden kann.

Um nun eine Modulation der Intensität des Plasmas 15 zu erreichen, steht bei einer Plasmaatzanlage 5 gemäß Figur 1 nun nicht nur die von dem Spulengenerator 13 über die Spule 11 in das Plasma 15 eingekoppelte Hochfrequenzleistung, sondern zusätzlich oder alternativ auch die Starke des von den Feldspulen 16 erzeugten Magnetfeldes innerhalb der Kammer 10 zur Verfügung. So setzt man zur Einstellung des ersten Plasmaintensitätsmaximums 40 beispielsweise zunächst Spulenströme in Feldspulen 16 ein, die den Zielstromwerten des Prozesses gemäß DE 100 51 831.1 entsprechen, d. h. beispielsweise

10 Ampère für die obere Feldspule 16 und 7 Ampère für die entgegengesetzt gepolte untere Feldspule 16.

Um danach in das Plasmaintensitätsminimum 41, 41' umzuschalten, werden diese Strome dann reduziert, beispielsweise so, dass beide Ströme in den Feldspulen 16 synchron auf null zurückgefahren oder getaktet werden. Alternativ können jedoch auch Zwischenwerte angefahren werden, beispielsweise 3 Ampère für die obere Feldspule 16 und 2 Ampère für die untere Feldspule 16.

Insofern werden in der einfachsten Ausführungsform beide Spulenströme jeweils zeitgleich zwischen einem hohen und einem niedrigen Extremwert hin und her geschaltet, wodurch der gleiche Effekt wie durch ein Zurückfahren der Leistung des Spulengenerators 13 bewirkt wird, d. h. die Plasmadichte bricht beim Zurücknehmen der Magnetspulenströme zusammen und erreicht das Plasmaintensitätsminimum 41, 41', wobei kurzzeitig eine hohe Anionendichte aus der Rekombination von Elektronen und Neutralgasteilchen entsteht. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich Magnetspulenströme nicht so schnell modulieren lassen wie die in das Plasma 15 eingekoppelte Hochfrequenzleistung. Insbesondere sind aufgrund der Induktivität der Feldspulen 16 lediglich Taktfrequenzen unter 10 kHz möglich. Andererseits ist die Variation eines Gleichstromes wesentlich einfacher und unproblematischer als die Variation einer hochfrequenten Wechselspannung mit Hilfe des Spulengenerators 13.

Besonders gunstig zur Vermeidung von reflektierten Leistungen ist es weiterhin, wenn die Änderung des elektrischen Stromes in den Feldspulen 16 nicht instantan erfolgt, sondern eine endliche Änderungsgeschwindigkeit aufweist, was natürlich auch für die Variation der Hochfrequenzleistung des Spulengenerators 13 gilt, bei dem eine Impedanzanpassung

mit Hilfe der ersten Matchbox 12 durch eine möglichst langsame Leistungsänderung generell leichter möglich ist.

5

Diese endliche Anderungsgeschwindigkeit lässt sich mit Hilfe einer Modulation der Magnetspulenströme besonders einfach gestalten, da man hier lediglich eine Gleichspannung bzw. einen Gleichstrom mit einer Modulationsspannung von endlicher Flankensteilheit überlagern muss.

So wird im Rahmen des erläuterten Ausführungsbeispiels beispielsweise eine Wechselspannung bzw. ein Wechselstrom an beiden Feldspulen 16 eingesetzt, der entsprechend den Gleichungen

$$U_1(t) = U_{01} \cdot \sin(\omega t) \quad U_2(t) = -U_{02} \cdot \sin(\omega t)$$

variiert. Die Wechselspannungen bzw. Ströme an den beiden Feldspulen 16 sind dabei zu jedem Zeitpunkt gegenphasig, wobei  $U_{01}$  und  $U_{02}$  die Spannungsamplituden bzw. Stromamplituden an jeweils einer der beiden Magnetfeldspulen 16 bezeichnen.

Alternativ ist es auch möglich, mit gleichgerichteten Wechselspannungen bzw. Strömen zu arbeiten, wobei dann der Ausdruck  $\sin(\omega t)$  jeweils durch den Absolutbetrag  $\text{abs}(\sin(\omega t))$  zu ersetzen ist.

Schließlich ist es, wie ausgeführt, vielfach auch vorteilhaft, die Magnetspulenströme nicht auf null zurückzufahren. Die Spulenspannungen bzw. Spulenströme durch die beiden Feldspulen 16 folgen dann beispielsweise den Gleichungen:

$$U_1(t) = U_{\text{offset},1} + U_{01} \cdot \text{abs}(\sin(\omega t))$$

$$U_2(t) = -U_{\text{offset},2} - U_{02} \cdot \text{abs}(\sin(\omega t))$$

Dabei sind die Offset-Ströme bzw. Offset-Spannungen  $U_{\text{offset},1}$  bzw.  $U_{\text{offset},2}$  jeweils derart dimensioniert, dass das Auftreten von sogenannten „Breaking-Effekten“ im Randbereich des Substrates 19 noch wirksam unterdrückt wird und damit noch

14.09.01

21

- 18 -

R. 41619

ein homogenes Atzergebnis über die gesamte Substratoberfläche erreicht wird.

Ist weiter die Frequenz  $\omega$  gemäß den vorstehenden Gleichungen vergleichsweise klein, d.h. beispielsweise 10 Hz bis 50 Hz, und die Geschwindigkeit der eingesetzten ersten Matchbox 12 bei der Impedanzanpassung hoch genug, um einer solchen Modulation der Plasmaintensität zu folgen, ist es auf die Weise sogar möglich, das Auftreten von reflektierten Leistungen in den Spulengenerator 13 gänzlich zu vermeiden, und trotzdem die unerwünschte Taschenbildung signifikant zu unterdrücken. Wesentlich ist dabei nur, dass die Dichte des Plasmas 15 moduliert wird und durch diese Modulation bevorzugt periodisch Phasen erhöhter Anionenkonzentration zur Verfügung stehen, die für eine Entladung von Trenchgraben mit hohem Aspektverhältnis sorgen.

23.08.01 Kut/Dm

ROBERT BOSCH GMBH, 70442 Stuttgart

5

**Patentansprüche**

1. Verfahren zum Einatzen von Strukturen in einen Ätzkörper, insbesondere von mit einer Atzmaske lateral exakt definierten Ausnehmungen in einen Siliziumkörper, mittels eines Plasmas, wobei in den Ätzkörper mittels einer hochfrequenten Wechselspannung zumindest zeitweilig eine hochfrequent gepulste, niederfrequent modulierte Hochfrequenzleistung eingekoppelt wird, dadurch gekennzeichnet, dass das Plasma (15) in seiner Intensität als Funktion der Zeit moduliert wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Intensität des Plasmas (15) zumindest zeitweise, insbesondere periodisch, zwischen einem über eine erste Zeitdauer aufrecht erhaltenen Maximumswert (40, 40') und einem über eine zweite Zeitdauer aufrecht erhaltenen Minimumswert (41, 41') moduliert wird, wobei der Minimumswert (41, 41') so gewählt ist, dass das Plasma (15) während der zweiten Zeitdauer nicht erlischt.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Minimumswert (41, 41') so gering gewählt ist, dass das Plasma (15) gerade nicht erlischt.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Intensität des Plasmas (15) zumindest zeitweise, insbesondere periodisch, derart moduliert wird, dass sie

über eine erste Zeitdauer einen Maximumswert (40, 40') aufweist und über eine zweite Zeitdauer auf Null absinkt.

5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Intensität des Plasmas (15) fortwährend periodisch zwischen einem über eine erste Zeitdauer aufrecht erhaltenen Maximumswert (40, 40') und einem über eine zweite Zeitdauer aufrecht erhaltenen Minimumswert (41, 41') moduliert, insbesondere rechteckförmig gepulst moduliert wird, wobei der Minimumswert (41, 41') so gewählt ist, dass das Plasma während der zweiten Zeitdauer nicht erlischt.

15. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in einem ersten Zeitabschnitt die Intensität des Plasmas (15) fortwährend periodisch zwischen einem über eine erste Zeitdauer aufrecht erhaltenen Maximumswert (40, 40') und einem über eine zweite Zeitdauer aufrecht erhaltenen Minimumswert (41, 41') moduliert, insbesondere rechteckförmig gepulst moduliert wird, wobei der Minimumswert (41, 41') so gewählt ist, dass das Plasma (15) während der zweiten Zeitdauer nicht erlischt, und dass in einem zweiten Zeitabschnitt die Intensität des Plasmas (15) über eine dritte Zeitdauer auf Null oder eine gegenüber dem Maximumswert (40, 40') verringerte Intensität (41) abgesenkt wird, insbesondere eine Intensität, bei der das Plasma (15) gerade nicht erlischt.

30. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass sich der erste und der zweite Zeitabschnitt periodisch abwechselnd, insbesondere unmittelbar aufeinander folgend wiederholen.

35. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die hochfrequent gepulste, nie-

derfrequent modulierte Hochfrequenzleistung und die modulierte Plasmaintensität derart miteinander korreliert werden, dass zu Zeiten, während derer ein niederfrequent getaktetes Pulspaket (30) in den Ätzkörper (19) eingekoppelt wird, ein Intensitätsmaximum (40) des Plasmas (15) vorliegt.

5

9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die hochfrequent gepulste, niederfrequent modulierte Hochfrequenzleistung und die modulierte Plasmaintensität derart miteinander korreliert werden, dass zu Zeiten, während derer eine niederfrequent getaktete Pulspause (31) an dem Ätzkörper (19) anliegt, ein Intensitätsminimum des Plasmas (15) vorliegt.

15

20

25

10. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das niederfrequent getaktete Pulspaket (30) eine Mehrzahl von sich abwechselnden, hochfrequent getakteten Pulsen (32) und Pulspausen (33) aufweist, wobei die Zeitdauer der Pulse (32) und die Zeitdauer der Pulspausen (33) ein erstes Puls-zu-Pause-Verhältnis definieren, und dass die erste Zeitdauer während der die Intensität des Plasmas (15) den Maximumswert (40') aufweist und die zweite Zeitdauer während der die Intensität des Plasmas (15) den Minimumswert (41') aufweist, ein zweites Puls-zu-Pause-Verhältnis definieren, und dass das zweite Puls-zu-Pause-Verhältnis größer als das erste Puls-zu-Pause-Verhältnis ist.

30

35

11. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenz mit der die hochfrequent getakteten Pulse (32) und die hochfrequent getakteten Pulspausen (33) der Hochfrequenzleistung sich wiederholen größer ist als die Frequenz mit der die Maximumswerte (40, 40') und die Minimumswerte (41, 41') der Intensität des Plasmas (15) sich wiederholen.

12. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenz mit der sich die niederfrequent getakteten Pulspakete (30) und die niederfrequent getakteten Pulspausen (31) sich wiederholen zumindest naherungsweise gleich ist der Frequenz, mit der der erste Zeitabschnitt und der zweite Zeitabschnitt sich wiederholen.

10 13. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenz mit der sich die niederfrequent getakteten Pulspakete (30) und die niederfrequent getakteten Pulspausen (31) sich wiederholen zumindest naherungsweise gleich oder kleiner ist als die Frequenz, mit der die erste Zeitdauer und die zweite Zeitdauer sich wiederholen.

15 14. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Modulation der Intensität des Plasmas (15) über eine insbesondere periodisch sich zeitlich andernde, in das Plasma (15) eingekoppelte Hochfrequenzleistung und/oder eine insbesondere periodisch sich zeitlich andernde Feldstarke eines auf das Plasma einwirkenden Magnetfeldes erfolgt.

20 25 15. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Atzkörper (19) mit einer Substratelektrode (18) in Verbindung steht, die mit der Hochfrequenzleistung beaufschlagt wird.

14.09.01 2

- 23 -

R. 41619

23.08.01 Kut/Dm

ROBERT BOSCH GMBH, 70442 Stuttgart

5

Verfahren zum Einatzen von Strukturen in einen Atzkörper mit einem Plasma

1.0

**Zusammenfassung**

Es wird ein Verfahren zum Einatzen von Strukturen in einen Atzkörper (19), insbesondere von mit einer Atzmaske lateral exakt definierten Ausnehmungen in einen Siliziumkörper, mittels eines Plasmas (15) vorgeschlagen. Dabei wird in den Atzkörper (19) mittels einer hochfrequenten Wechselspannung zumindest zeitweilig eine hochfrequent gepulste, niederfrequent modulierte Hochfrequenzleistung eingekoppelt und daneben das Plasma (15) in seiner Intensität als Funktion der Zeit moduliert.

15

20

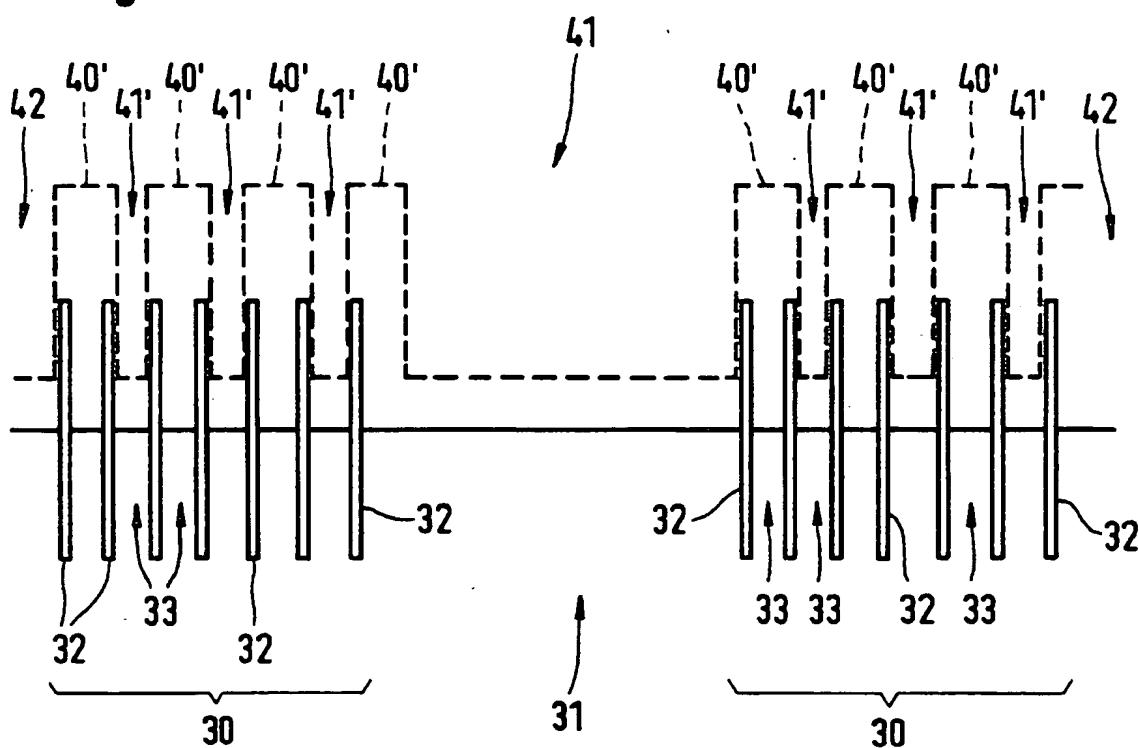
Figur 6

14-09-01

R.41619

4/4

Fig. 6



14-09-0 R. 41619

26

1/4

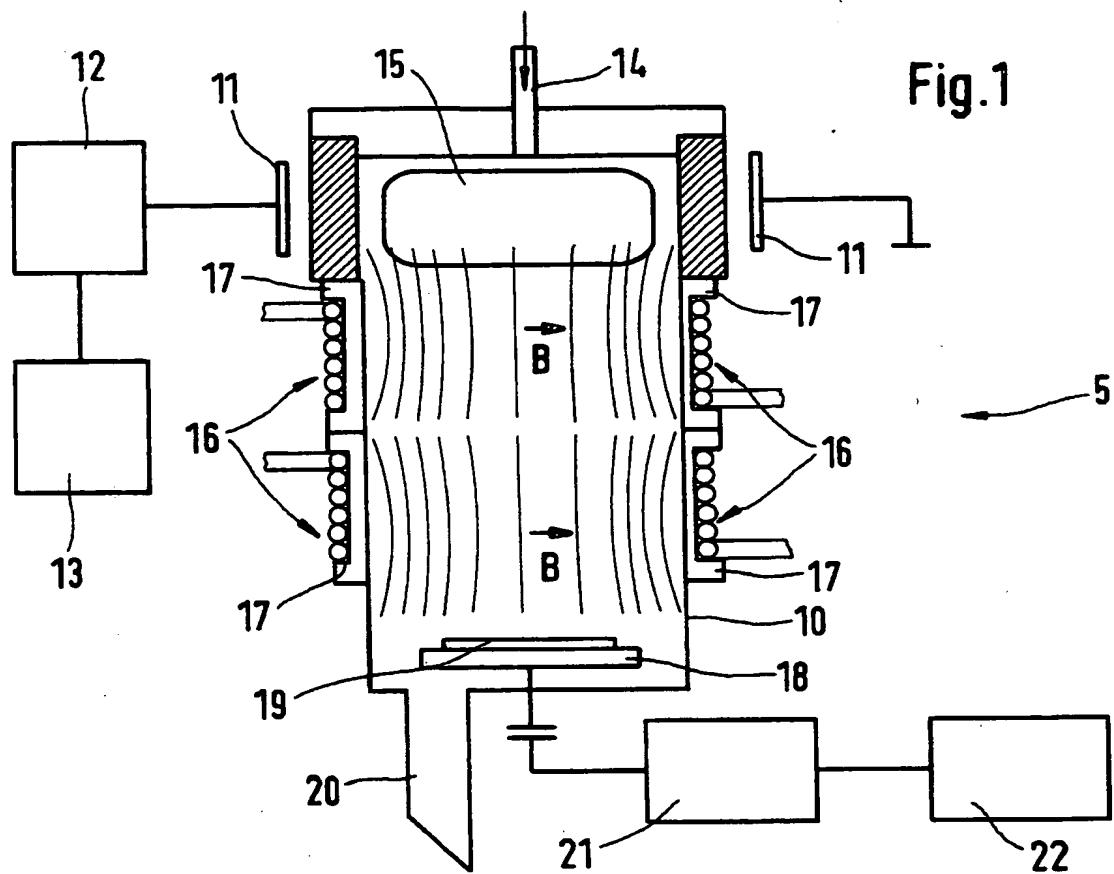
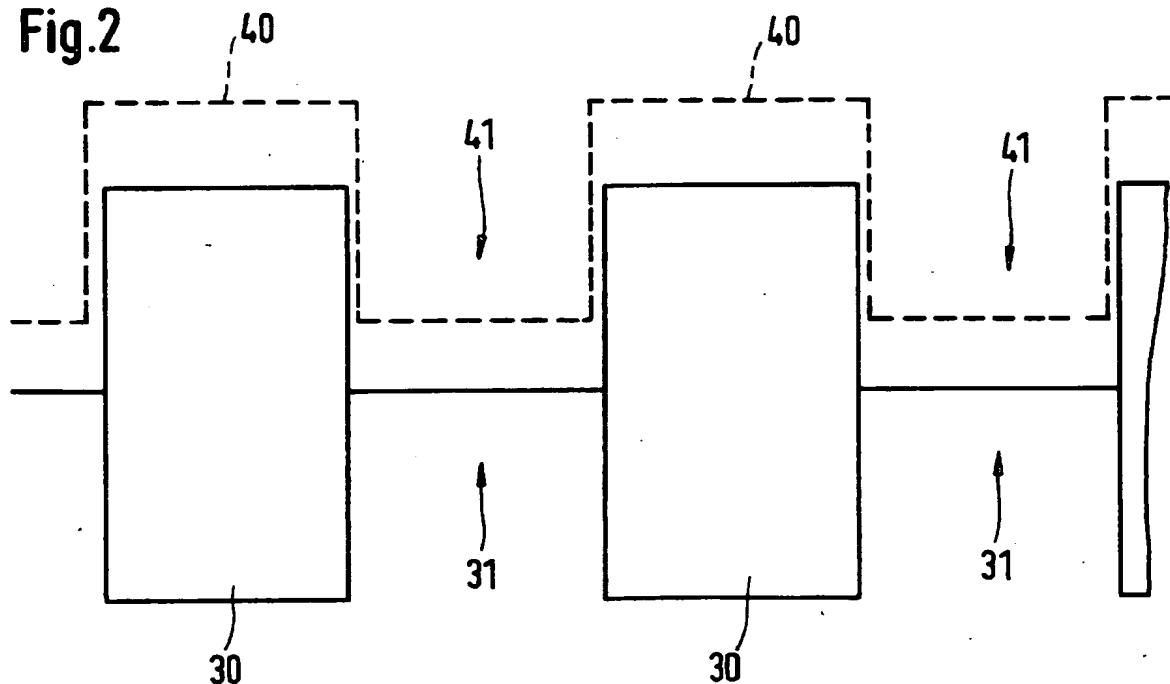


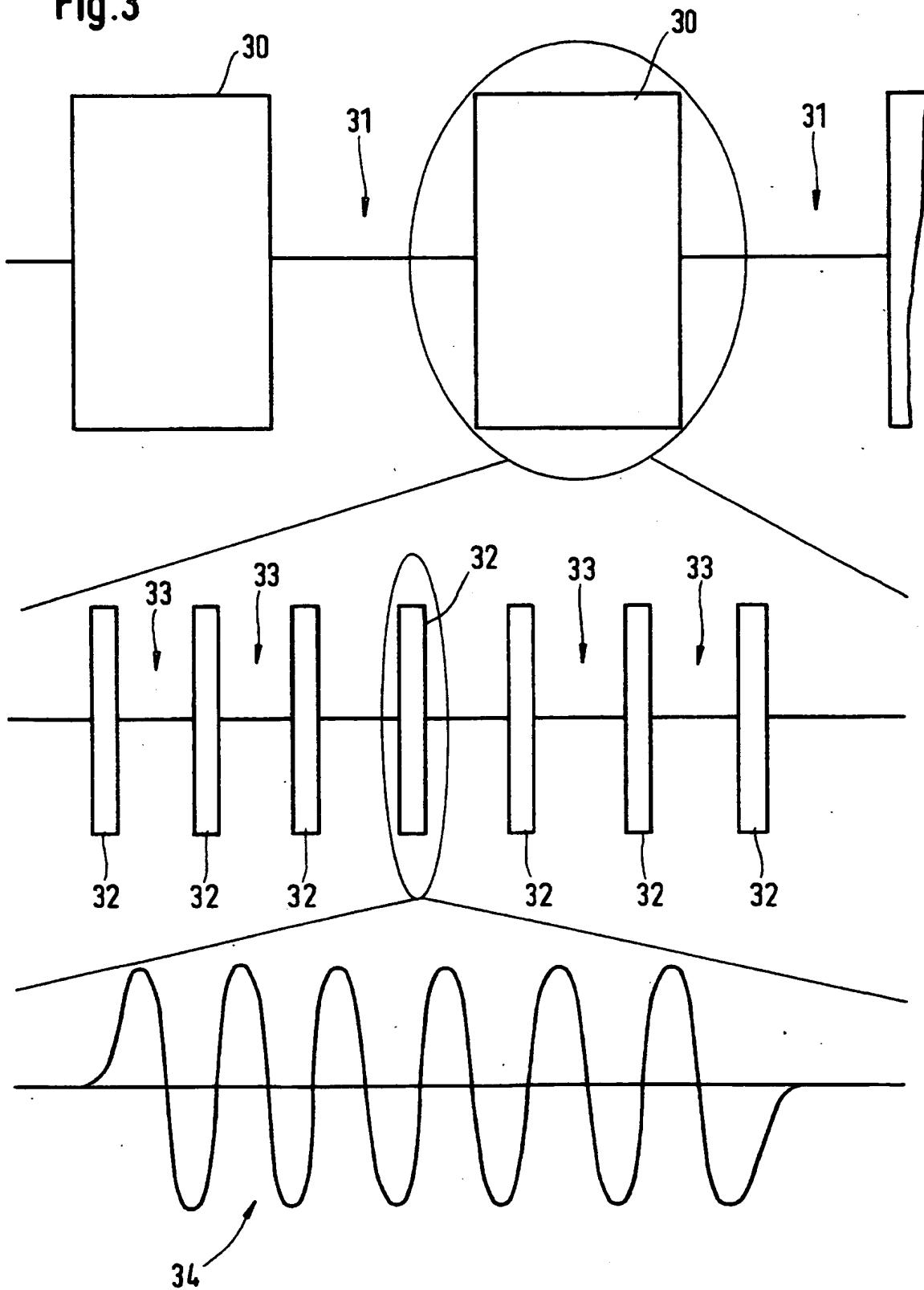
Fig. 2



101452377 24.06.2010

2/4

Fig.3



3 / 4

Fig.4

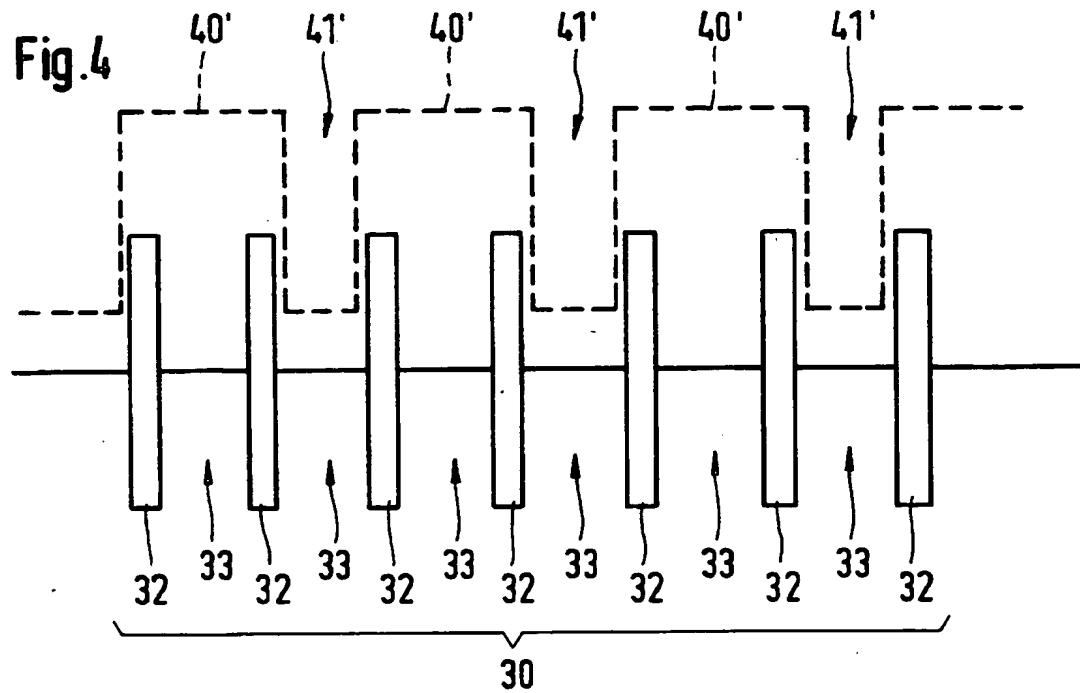
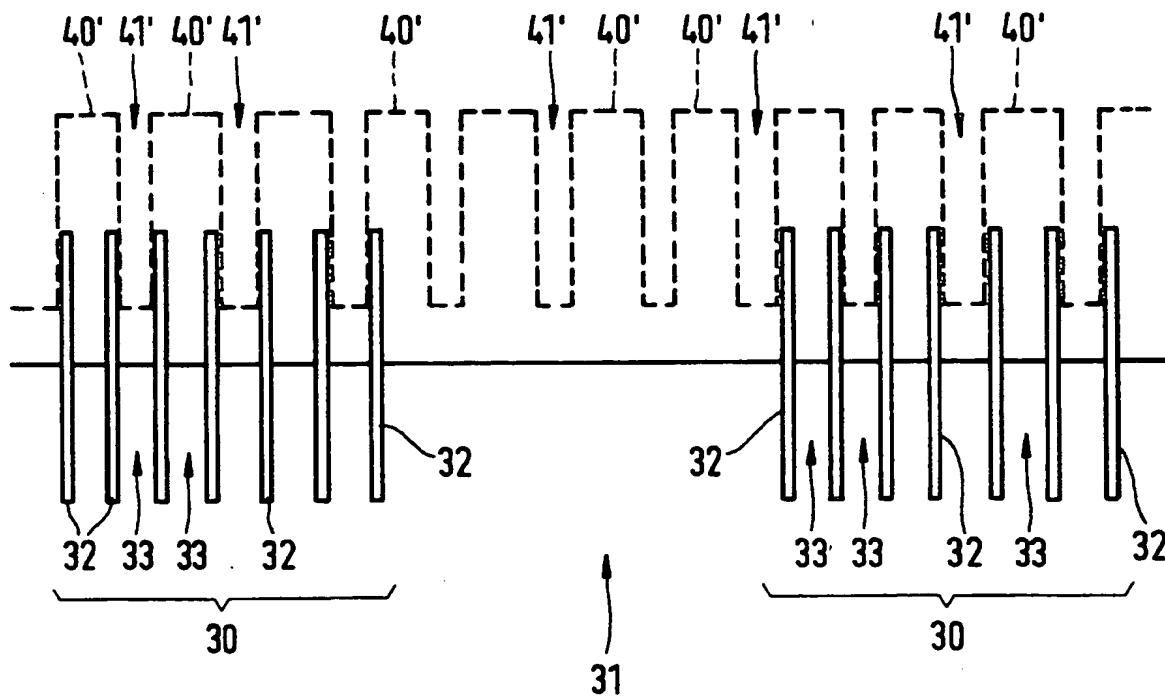


Fig.5



14-09-0 8.41619

4/4

Fig.6

